

УДК 621.923.42

В.І. Кальченко, д-р техн. наук, Н.М. Сіра, В.О. Винник, Д.В. Кальченко,  
Чернігів, Україна

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДВОСТОРОННЬОГО ШЛІФУВАННЯ ТОРЦІВ ХРЕСТОВИН КАРДАННИХ ВАЛІВ ОРІЄНТОВАНИМИ ШЛІФУВАЛЬНИМИ КРУГАМИ**

*Запропоновано тривимірне геометричне моделювання інструментів, процесу зняття припуску та формоутворення при двосторонньому торцевому шліфуванні хрестовин карданних валів, що не обертаються та обертаються під час шліфування. Обробка деталей виконується орієнтованими шліфувальними кругами. При здійсненні чистового шліфування однієї деталі інша не повинна входити в зону обробки для забезпечення високої точності обробленої поверхні. Наведено розрахунок сил різання при шліфуванні торців хрестовин карданних валів.*

*Ключові слова: двостороннє торцеве шліфування, хрестовини карданних валів*

*Предложено трехмерное геометрическое моделирование инструментов, процесса снятия припуска и формообразования при двухстороннем торцевом шлифовании крестовин карданных валов, которые не вращаются и вращаются во время обработки. Обработка деталей выполняется ориентированными шлифовальными кругами. При осуществлении чистового шлифования одной детали другая деталь не должна входить в зону обработки для обеспечения высокой точности обработанной поверхности. Приведен расчет сил резания при шлифовании торцов крестовин карданных валов.*

*Ключевые слова: двухстороннее торцевое шлифование, крестовины карданных валов*

*Three-dimensional geometric modeling of tools, the process of removal of stock and shaping in two-sided face grinding of the crosses of cardan shafts, which do not rotate and rotate during machining, is proposed. The workpieces are processed by oriented profiled grinding wheels. When finishing one part in a perfect grinding process, the other part must not enter the machining area to ensure high precision of the machined surface. The calculation of the cutting forces for grinding the ends of the crosses of cardan shafts is given*

*Keywords: two-sided face grinding, crosses of cardan shafts*

Отримання високоточних деталей в машинобудуванні пов'язане із широким застосуванням сучасних технологій механічної обробки, які повинні забезпечувати високу точності оброблюваних поверхонь і продуктивності обробки. У значній мірі це відноситься до обробки деталей з високими вимогами до точності торцевих поверхонь, таких як, хрестовини карданних валів, і ін.

Хрестовини карданних валів мають дуже широке застосування в автомобілебудуванні, в сільськогосподарських машинах, на різноманітних виробництвах для з'єднання силових агрегатів та передачі обертання від двигунів до приводів різних типів. Вони використовуються у легкових та вантажних автомобілях для передачі крутного моменту від силового агрегату до ведучих коліс, а також у керованих механізмах. Хрестовини карданних

валів набули значного поширення, тому підвищення ефективності обробки та продуктивності виробництва необхідно розглядати нові методи моделювання процесу обробки і отримання кращих результатів розрахункової точності торців оброблених деталей.

Найбільш продуктивним способом шліфування торцевих поверхонь деталей є шліфування на двосторонніх торцешліфувальних верстатах. Обробка торцевих поверхонь на цих верстатах є більш високоефективною в порівнянні з обробкою на плоскошліфувальних та односторонніх торцешліфувальних верстатах.

Розробка нових взаємопов'язаних модульних 3D-моделей інструментів та формоутворення, які описують процес двостороннього шліфування торцевих поверхонь хрестовин карданних валів орієнтованими шліфувальними кругами. Дослідження способу кріплення хрестовин карданних валів модульних 3D-моделей сприятимуть створенню нових високоефективних способів та технологій шліфування торців деталей і їх впровадженню в промисловість.

В роботах [1, 2] наведено модульне 3D-моделювання двостороннього торцевого шліфування деталей з циліндричними торцевими поверхнями.

Відома фірма Saturn (Німеччина) [3] здійснює обробку деталей на двосторонніх торцешліфувальних верстатах, але шліфування відбувається з невеликим нахилом шліфувальних кругів тільки в одній площині, що потребує декілька проходів при знятті великих припусків.

Розрахунок сил різання які виникають при шліфуванні наведено в [4-9]. В роботі [10] досліджено вплив теплових явищ, жорсткості системи ВПІД на точність та якість оброблюваних деталей. В [11] наведено розрахунок продуктивності шліфування, інтенсивності зносу інструменту та теплонапруженості процесу шліфування.

Але в цих роботах не розглядається загальна модульна 3D-модель двостороннього торцевого шліфування хрестовин карданних валів що не обертаються та обертаються під час обробки. Не досліджено вплив способу фіксації хрестовин карданних валів в радіальному та осьовому напрямках на геометричну точність формоутворення оброблюваних поверхонь.

Метою даної роботи є створення модульної 3D-моделі, процесів зняття припуску та формоутворення торцевих поверхонь деталей, розрахунок сил різання, усунення суміщення перехідних процесів при чистовій обробці деталей. Це дозволить аналізувати процеси зняття припуску та формоутворення, розробити нові способи, а на їх базі високоефективні технології шліфування торцевих поверхонь хрестовин карданних валів.

На рис. 1 зображено розрахункову схему шліфування торцевих поверхонь хрестовин карданних валів на двосторонньому торцешліфувальному верстаті. Шліфувальні бабки 1, 2 разом з кругами 3, 4 повертають на кути  $\varphi$ ,  $\psi$  відносно сферичного шарніра 8. Деталі 5 подаються

в зону обробки за допомогою барабана подачі виробів 6. Перед обробкою шліфувальний круг правлять. Правлячий інструмент 8 призначений для правки чорноточної ділянки шліфувального круга.

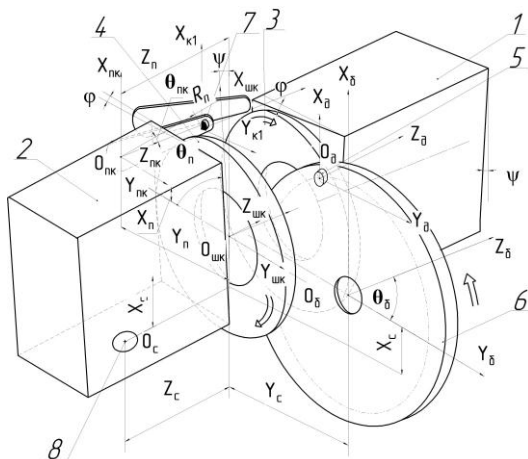


Рисунок 1 – Розрахункова схема формоутворення торців хрестовин карданних валів

Формоутворення торцевої поверхні деталі при обробці орієнтованими шліфувальними кругами здійснюється максимальним діаметром, радіус-вектор якого описується рівнянням:

$$R_{instr}(\theta_p, \theta) := C(0, \theta, 0) \cdot So(-X_c, \varphi, \psi) \cdot P(0, Y_c, X_c) \cdot C(Z_c, -\theta_p, R_b) \cdot e_4 \quad (1)$$

де  $C(Z_c, -\theta_p, R_b)$  – циліндричний модуль інструментальної поверхні;  $P(0, Y_c, X_c)$  – прямокутний модуль переносу;  $So(-X_c, \varphi, \psi)$  – сферичний модуль орієнтації;  $C(0, \theta, 0)$  – циліндричний модуль формоутворення;  $\varphi, \psi$  – кути повороту шліфувального круга;  $X_c, Y_c, Z_c$  – розміри розташування сферичного шарніра;  $\theta, \theta_p$  – параметри поверхні ріжучого інструмента;  $R_b$  – радіус розташування деталей в барабані подачі виробів.

Остаточна точність торцевих поверхонь деталей формується колом найбільшого радіуса.

Радіус-вектор поверхні деталі:

$$R_{det}(\theta_0, \theta_p, \theta) := C(0, \omega, 0) \cdot C_t(-R_b, \theta_0, 0) \cdot P(-Z_c, -Y_c, -X_c) \cdot S(-\varphi, -\psi, X_c) \cdot R_{instr}(\theta_p, \theta) \quad (2)$$

де  $So(-\varphi, -\psi, X_c)$  – сферичний модуль орієнтації;  $P(-Z_c, -Y_c, -X_c)$  – прямокутний модуль переносу;  $C_t(-R_b, \theta_0, 0)$  – циліндричний модуль формоутворення;  $C(0, \omega, 0)$  – циліндричний модуль, що відповідає за орієнтацію деталі відносно напрямку подачі;  $\omega$  – обертання деталі;  $\theta_0$  – кутова координата положення заготовки відносно системи координат круга.

Радіус-вектор кола найбільшого  $R_{max}$  радіуса:

$$R_{\max}(\theta) := C(Z_{\max}, \theta, R_{\max}) \cdot e^4 \quad (3)$$

де  $R_{\max}$  –максимальний радіус шліфувального круга;  $\theta$  – кутовий параметр шліфувального круга;  $Z_{\max}$  – максимальне значення висоти шліфувального круга, мм.

Рівняння однопараметричного огинання має вигляд:

$$\frac{\partial \bar{R}_{\det}}{\partial \theta} \times \frac{\partial \bar{R}_{\det}}{\partial \theta_p} \cdot \frac{\partial \bar{R}_{\det}}{\partial \theta_o} = 0. \quad (4)$$

На рис. 2 зображено відхилення від площинності торця хрестовини карданного вала, що не обертається під час обробки при шліфуванні орієнтованими шліфувальними кругами.

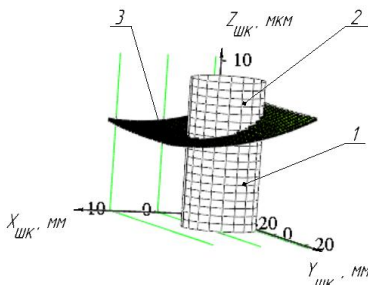


Рисунок 2 – Точність формоутворення торця хрестовини карданного вала

На рис. 3 зображено відхилення від площинності торця хрестовини карданного вала, що обертається під час обробки при шліфуванні орієнтованими шліфувальними кругами.

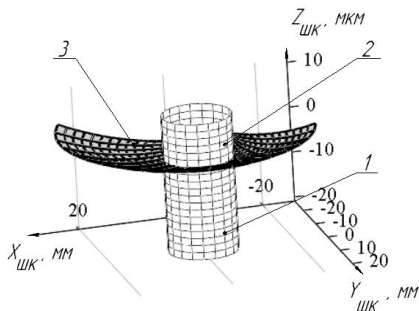


Рисунок 3 – Точність формоутворення торця хрестовини карданного вала

На рис. 4 зображено способи фіксації хрестовини карданного вала 1 в барабані подачі виробів 4 двостороннього торцешліфувального верстата при обробці орієнтованими шліфувальними кругами 5, 6. Хрестовина карданного вала 1 (рис. 4, а) фіксується за допомогою пристрою, який складається з двох частин 2, 3, що з'єднуються за допомогою різьби. Якщо не затягувати різьбу до упору, пристрій дозволяє деталі обертатись, що підвищує точність формоутворення, але знижує симетричність торців за рахунок наявності зазорів.

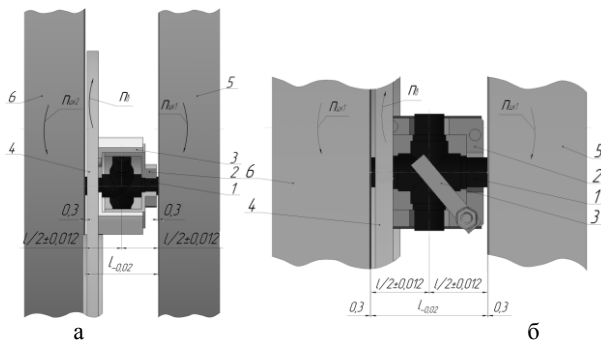


Рисунок 4 – Способи фіксації хрестовини карданного вала

На рис. 4, б зображено пристрій 2, де хрестовина карданного вала 1 кріпиться нерухомо в призмах, зверху притискається прихватом 3 що забезпечує підвищення симетричності торців, але збільшується геометрична похибка формоутворення.

На рис. 5 наведено графік похибки формоутворення торця хрестовини карданного вала діаметром 15 мм по контуру, де при обробці деталь фіксується в кутовому та осьовому напрямках та не обертається під час обробки.

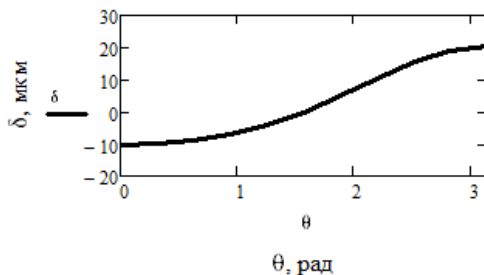


Рисунок 5 – Геометрична похибка формоутворення торців хрестовин карданних валів

На рис. 5 та рис. 6 зображено графіки залежності похибки формоутворення торця хрестовини карданного вала діаметром 15 мм, що не обертається (рис. 5) та обертається (рис. 6) під час обробки.

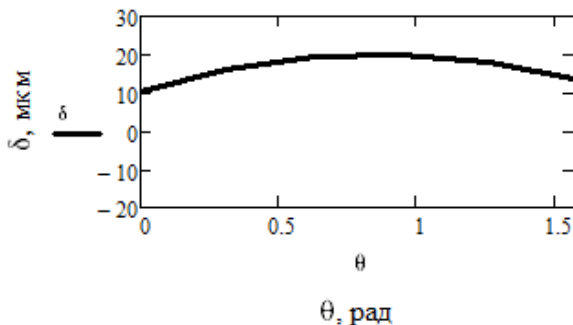


Рисунок 6 – Похибка формоутворення торця хрестовини карданного вала по координаті обробки

Як видно з графіків (рис. 5 та 6), під час обертання точність формоутворення більша.

Сили при шліфуванні торцевих поверхонь можна визначити з [9, 12].

Сили різання можна визначити за допомогою експериментально визначеної потужності за формулою [13]:

$$P_{z_i} = \frac{N p_{i3} z_i}{V_i}, \quad (6)$$

де  $N p_{i3}$  – потужність шліфування торців деталей;

$V_i$  – швидкість різання, яка визначається з рівняння (7).

$$V_i = \frac{\pi \cdot D_i \cdot n}{60 \cdot 1000}, \quad (7)$$

де  $D_i$  – діаметр розташування центра деталі на поверхні шліфувального круга;

$n$  – частота обертання шліфувального круга.

Визначена експериментально активна потужність при шліфуванні зображена на рис. 7.

На рис. 7 зображено графік активної потужності, яка витрачається на шліфування торця хрестовини карданного вала.



Число деталей  $m$ , які одночасно оброблюються на верстаті, визначається з виразу [15]:

$$m = L / l, \quad (8)$$

де  $L = R\theta_L$  – довжина дуги контакту, на радіусі  $R$ , (рис. 9) подаючого барабана 3, деталі 2 з кругом 1 в межах кута  $\theta_L$ ;

$l = R\theta_1$  – відстань між деталями на радіусі  $R$  барабана подачі виробів.

Загальна сила різання визначається як сума сил різання при одночасній обробці всіх деталей в даний момент часу.

Сумарна сила буде змінюватись при проходженні деталі шляху  $l$ , після чого вона буде приймати ті ж значення, при проходженні наступних деталей шляху  $l$ .

На рис. 10 наведено графік залежності сумарної сили  $P_{z\Sigma}$  від часу обробки.

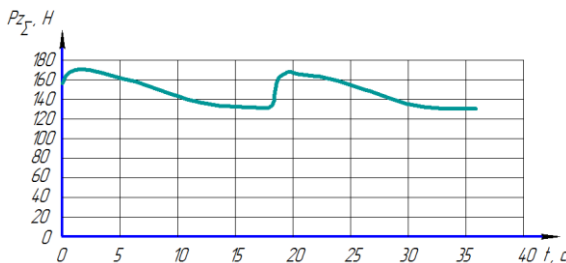


Рисунок 10 – Сумарна сила різання  $P_{z\Sigma}$

Як бачимо (рис. 10) максимальна сила буде при входженні деталі в зону обробки, потім зменшується і знову зростає, коли входить друга деталь.

#### Висновок

Запропоновано модульне 3D-моделювання інструментів, процесів зняття припуску та формоутворення торцевих поверхонь деталей, при розрахунку точності формоутворення хрестовин карданних валів що не обертаються та обертаються під час обробки.

Досліджено вплив способу фіксації хрестовин карданних валів в барабані подачі виробів на геометричну точність формоутворення. При кріпленні хрестовин карданних валів нерухомо в призмах забезпечується підвищення симетричності торців, але збільшується геометрична похибка формоутворення. При обертанні деталей під час обробки геометрична точність формоутворення буде більше, але симетричності торців менша.



При вході однієї деталі в зону обробки відбувається різке зростання сили різання, що збільшує похибку формоутворення торцевої поверхні деталі, що виходить з зони обробки. Запропоновано розташовувати кріплення деталей в барабані подачі виробів на відстані, що більше або дорівнює діаметру оброблюваних торцевих поверхонь хрестовин карданних валів, що дозволить забезпечити високу точність формоутворення.

**Список використаних джерел:** 1. *Гребченко А.И., Кальченко В.И., Кальченко В.В.* Шлифование со скрещивающимися осями инструмента и детали (Монография). – Чернигов: ЧГТУ, 2009. – 356 с. 2. *Кальченко В.В.* Наукові основи ефективного шліфування зі схрещеними осями абразивного інструменту та деталі // Дисертація докт. техн. наук. Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – 489 с. 3. *Saturn.* Торцевое шлифование спаренными шлифовальными кругами: [Журнал для клиентов фирмы «Junkermaschinen»] / ErwinJunker: Maschinenfabric Gmbh, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 77787. – Nordrash, Germany, 2005 – 8 с. 4. *Кальченко В.И., Погиба Н.Н., Кальченко Д.В.* Определение составляющих силы резания при глубинном шлифовании поверхностей вращения ориентированным эльборовым кругом // Сверхтвердые материалы: научно-теоретический журнал, 2012. – №2(196). – С. 58-73. 5. *Volodymyr Kalchenko, Andriy Yeroshenko and others* Determination Of Cutting Forces In Grinding With Crossed Axes Of Tool And Workpiece // Acta mechanica et automatica, 2017. – vol.11 no.1. – pp. 58-63. 6. *Шаховский С.С.* Силы при двустороннем торцевшлифовании // Станки и инструмент. 1973. -№ 1. - С. 20 – 21. 7. *Вайнер Л. Г.* Моделирование сил резания и характеристик съема припуска при двустороннем шлифовании торцов одиночной заготовки / Л. Г. Вайнер // Новые материалы и технологии в машиностроении. Сборник научных трудов по итогам международной научно-технической конференции. Выпуск 14. - Брянск: БГИТА, 2011.-С. 14-17. 8. *Каминская В.В., Вайнер Л.Г.* Расчетное определение сил резания при обработке торцов роликов на двухстороннем торцешлифовальном станке. - Повышение эффективности использования технологического оборудования, гибких автоматизированных станочных комплексов: Тез. докл. науч.- техн. конф. - Комсомольск на Амуре: ХЦНТИ, 1985, с. 12-13. 9. *Кальченко В.И., Кальченко В.В., Следникова О.С.* Дослідження процесу шліфування торців орієнтованих деталей профільованими кругами // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Черкаси: ЧДТУ. – 2016. - №4(2016). С. 72-82. 10. *Кальченко В.И., Кальченко В.В. і ін.* Дослідження способу шліфування валків стрічкопрокатних станив зі схрещеними осями інструмента та деталі // «Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки» – Черкаси: ЧДТУ, 2016. – №4/2016. – С. 80-88. 11. *Кальченко В.И., Кальченко В.В. і ін.* Теоретичне та експериментальне дослідження процесів зняття припуску, зносу круга, точності формоутворення та теплонапруженості при шліфуванні циліндричних та ступінчатих валів зі схрещеними осями деталі та круга // Технічні науки та технології: науковий журнал. / Черніг. нац. технол. ун-т. – Чернігів : Черніг. нац. технол. ун-т, 2016. – №4(6). – С. 35-43. 12. *Филимонов Л.Н.* Плоское шлифование / Л.Н. Филимонов – Л.: Машиностроение, 1985. – 109 с. 13. *Кальченко В.И., Венжеев В.И. і ін.* Теоретичне та експериментальне дослідження процесів зняття припуску, зносу кругів, точності формоутворення та теплонапруженості під час шліфування торців деталей // Технічні науки та технології : науковий журнал / Чернігів. нац. технол. ун-т. – Чернігів : Чернігів. нац. технол. ун-т. – 2016. – № 4 (6). – С. 25-34. 14. *Кудинов, В.А.* Динамика станков / В.А. Кудинов. - М.: Машиностроение, 1967. - 359 с. 15. *Кальченко В.В., Следникова О.С. і ін..* Дослідження процесу двостороннього шліфування циліндричних деталей з торцями різних діаметрів орієнтованими шліфовальними кругами // Технічні науки та технології : науковий журнал - Чернігів. нац. технол. ун-т. – 2017. – № 2 (8). – С. 40-48.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Grabchenko A.I., Kalchenko V.I., Kalchenko V.V.* Shlifovanie so skreshchivaiushchimisia osiami instrumenta i detali (Monografiia). – Chernigov: ChGTU, 2009.– 356 s. 2. *Kalchenko V.V.* Naukovi osnovy efektyvnoho shlifuvannia zi skreshchennyimi osiamy abrazyvnoho

instrumentu ta detali // Dysertatsiia dokt. tekhn. nauk. Kharkiv: NTU «KhPI». – 2006. – 489 s. **3.** Saturn. Tortcevoe shlifovanie sparennymi shlifoval'nymi krugami: [Zhurnal dlja klientov firmy «Junkermaschinen»] / ErwinJunker: Maschinenfabric Gmbh, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 77787. – Nordrash, Germany, 2005 – 8 s. **4.** Kalchenko V.I., Pogiba N.N., Kalchenko D.V. Opredelenie sostavliaiushchikh sily rezaniia pri glubinnom shlifovanii poverkhnosti vrashcheniia oriietirovannym elborovym krugom // Sverkhverdye materialy: nauchno- teoreticheskii zhurnal, 2012. – №2(196). – S. 58-73. **5.** Kalchenko V.V., Yeroshenko A.M., Boiko S.V. & Sira N.M. (2017) Determination Of Cutting Forces In Grinding With Crossed Axes Of Tool And Workpiece. Acta mechanica et automatica, vol.11 no.1. – pp. 58-63. **6.** Shakhnovskii S.S. Sily pri dvustoronnem tortceshlifovanii // Stanki i instrument. 1973. -№ 1. - S. 20 – 21. **7.** Vainer L.G. Modelirovanie sil rezaniia i kharakteristik sema pripuska pri dvustoronnem shlifovanii tortcov odinochnoi zagotovki / L.G. Vainer // Novye materialy i tekhnologii v ma- shinostroenii. Sbornik nauchnykh trudov po itogam mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Vypusk 14. - Briansk: BGITA, 2011.-S. 14-17. **8.** Kaminskaia V.V., Vainer L.G. Raschetnoe opredelenie sil rezaniia pri obrabotke tortcov rolikov na dvukhshtonnem tortceshlifovalnom stanke. - Povyshenie effektivnosti ispolzovaniia tekhnologicheskogo oborudovaniia, gibkikh avtomatizirovannykh stanochnykh kompleksov: Tez. dokl. nauch.- tekhn. konf. - Komsomolsk –na-Amure: KhTcNTI, 1985, s. 12-13. **9.** Kalchenko V.I., Kalchenko V.V., Slidnikova O.S. Doslidzhennia protsesu shlifuvannia tortsiv oriietovanykh detalei profilovanykh kruhamy // Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky. – Cherkasy: ChDTU. – 2016. - №4(2016). S. 72-82. **10.** Kalchenko V.I., Kalchenko V.V. i in. Doslidzhennia sposobu shlifuvannia valkiv strichkopratnykh staniv zi skhreshchenymy osiamy instrumenta ta detali // «Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky» – Cherkasy: ChDTU, 2016. – №4/2016. – S. 80-88. **11.** Kalchenko V.I., Kalchenko V.V. i in. Teoretychne ta eksperymentalne doslidzhennia protsesiv znattiia prypusku, znosu kruha, tochnosti formoutvorennia ta teplonapruzhenosti pry shlifuvanni tsylindrychnykh ta stupinchatykh valiv zi skhreshchenymy osiamy detali ta kruha // Tekhnichni nauky ta tekhnolohii: naukovi zhurnal. / Chernih. nats. tekhnol. un-t. – Chernihiv : Chernih. nats. tekhnol. un-t, 2016. – №4(6). – S. 35-43. **12.** Filimonov L.N. Ploskoe shlifovanie / L.N. Filimonov – L.: Mashinostroenie, 1985. – 109 s. **13.** Kalchenko V.I., Venzheha V.I. i in.. Teoretychne ta eksperymentalne doslidzhennia protsesiv znattiia prypusku, znosu kruhiv, tochnosti formoutvorennia ta teplonapruzhenosti pid chas shlifuvannia tortsiv detalei // Tekhnichni nauky ta tekhnolohii : naukovi zhurnal / Chernihiv. nats. tekhnol. un-t. – Chernihiv : Chernihiv. nats. tekhnol. un-t. – 2016. – № 4 (6). – S. 25-34. **14.** Kudinov, V.A. Dinamika stankov / V.A. Kudinov. - M.: Mashinostroenie, 1967. - 359 s. **15.** Kalchenko V.I., Slidnikova O.S. i in. Doslidzhennia protsesu dvustoronnoho shlifuvannia tsylindrychnykh detalei z tortsiamy ryznykh diametriv oriietovanykh shlifovalnymi kruhamy // Tekhnichni nauky ta tekhnolohii : naukovi zhurnal. – Chernihiv : Chernihiv. nats. tekhnol. un-t. – 2017. – № 2 (8). – S. 40-48.